

### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. M. Voganti, F. Ercal, C. Dagli, S. Tsunekawa. Automatic PCI Inspection Algorithms: A Survey // Computer Vision and Image Understanding. - 1996. - Vol. 63. - p. 287-313.
2. J. Wickel, P. Alvarado, P. Dörfler et al. Axiom — a modular visual object retrieval system // M. Jarke, J. Koehler, and G. Lakemeyer, editors, KI 2002: Advances in Artificial Intelligence. - LNAI 2479. - Springer, 2002. - p. 253–267.
3. D. Argiro, S. Kubica, M. Young, and S. Jorgensen. Khoros: An integrated development environment for scientific computing and visualization. Whitepaper, Khoros Research, Inc., 1999.
4. W. Gropp, E. Lusk, and A. Skjellum. *Using MPI: Portable Parallel Programming with the Message Passing Interface*. - MIT Press. - 1995.
5. A. Doudkin, A. V. Inyutin, M. E. Vatkin. Objects identification on the color layout images of the integrated circuit layers // Proceedings of 3rd IEEE International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, 5-7 September 2005, Sofia, Bulgaria. - IEEE, 2005. - p. 610-614.
6. A. Doudkin, D. A. Vershok. Integrated circuit and photomask images processing technology // J. AMSE. – 2005. - p. 81-88.
7. K. Hwang, Z. Xu. Scalable Parallel Computing – Technology, Architecture, Programming. - McGraw-Hill, USA, 1998.
8. Р. Х. Садыхов, А. В. Отвагин. Алгоритм поиска решений на основе модели виртуальной сети в системах параллельной обработки // Автоматика и вычислительная техника. – №1. – Рига, Латвия. – 2001. – С. 25-33.
9. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы.: Учебное пособие / Под ред. В.М.Курейчика. - М.: Физматлит, 2004.

Статья поступила в редакцию 28.01.2007

УДК [004.5+681.3]:691-419

Разумейчик В.С., Дереченник А.С., Дереченник С.С.

## АНАЛИЗ ПОРИСТОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПРОЦЕДУРЫ ИЗОМЕТРИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ ПОРОВЫХ СЕГМЕНТОВ ЦИФРОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

### Введение

Пористость является одной из важнейших характеристик композиционных материалов (композитов) и определяет их основные эксплуатационные свойства – влаго- и газопроницаемость, жесткость, прочность и т.д. В материаловедении пористый материал рассматривается как дисперсная структура, в которой поры (пустоты различного размера и формы – сферы, капилляры, микротрещины и т.п.) составляют, в совокупности, дисперсную фазу, неупорядоченно расположенную в дисперсионной среде – твердой фазе. Отдельные поровые пустоты могут сливаться, порождая широкое многообразие конфигураций пространственных кластеров – как прерывистых, изолированных друг от друга, так и перколяционных, т.е. допускающих протекание газа или жидкости из одного кластера в другой. Сложность и неупорядоченность структуры порового пространства, равно как и тесная связь характеристик пористости с важными для практики свойствами материала, обуславливают актуальность экспериментальных и теоретических исследований пористости в широком спектре прикладных задач материаловедения.

Типичными по своей природе капиллярно-пористыми композитами являются материалы на основе цемента – цементный камень, раствор и бетон. Они характеризуются, в общем случае, весьма сложной многоуровневой структурой составляющих материал фаз, в том числе и порового пространства. Оказывая огромное влияние на важнейшие физико-механические свойства формируемого материала, пористость цементных композитов в то же время очень чувствительна к технологическим факторам. В связи с этим изучение пористости цементных композитов необходимо как для обеспечения качества строительных изделий, так и при разработке новых технологий создания строительных материалов с заданными свойствами.

### Характеристики и методы исследования пористости цементных композитов

Разумейчик Вита Станиславовна, ассистент кафедры «ЭВМ и системы» БрГТУ, [vita\\_r@tut.by](mailto:vita_r@tut.by).

Дереченник Анна Станиславовна, аспирант кафедры «ЭВМ и системы» БрГТУ, [ann\\_derechennik@tut.by](mailto:ann_derechennik@tut.by).

Дереченник Станислав Станиславович, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «ЭВМ и системы» БрГТУ, [chief.cm@bstu.by](mailto:chief.cm@bstu.by).  
Беларусь, Брестский государственный технический университет, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Согласно одной из классификаций, по степени дисперсности (т.е. размерам, или эффективным радиусам), поры цементного камня и бетона делят на группы [1]:

- микрокапилляры (радиус менее 0,1 мкм), которые могут заполняться за счет сорбции паров из окружающей среды и образования пленок на стенках;
- макрокапилляры (мезопоры между частицами геля радиусом от 0,1 до 1...10 мкм), заполняющиеся жидкостью только при непосредственном контакте с ней;
- некапиллярные (технологические) поры – дефекты структуры, которые могут быть связаны с вовлеченным или защемленным воздухом, раковинами и т.п.

В зависимости от масштабного уровня исследования, иногда дополнительно различают также ультра-микропоры (так называемые гелевые поры с надмолекулярным уровнем дисперсности 0,5...5 нм) и переходные микропоры (5...10 нм).

Структура порового пространства, в первом приближении, характеризуется объемом пор (интегральные параметры), а также их размерами и удельной поверхностью (дифференциальные параметры).

Основной интегральный параметр – истинная (полная) пористость, определяемая как доля суммарного объема порового пространства материала. Эмпирические методы исследования позволяют, как правило, найти лишь открытую (кажущуюся, или доступную) пористость, т.е. суммарный объем всех пор, соединяющихся между собой и с поверхностью материала, и потому доступных для определения данным экспериментальным методом. При этом не учитывается т.н. условно замкнутая пористость – объем изолированных от поверхности образца пор и поровых кластеров.

Наиболее употребительные дифференциальные параметры:

- функция распределения объема, поверхности или количества пор по размерам;
- различного рода условные размеры пор: средний, эффективный, гидравлический, максимальный и т.п. радиусы;
- геометрические характеристики пор: форма, взаимное

расположение, прямолинейность, извилистость, замкнутость и т.д.

Дифференциальные параметры имеют некоторую условность, связанную с тем, что во всех методах их определения принимают упрощенные структурные модели пор, основанные на приближении формы пор, например сферами и/или цилиндрическими капиллярами. Реальные поры, конечно, не обладают идеальными формами, поэтому и найденные параметры пористости являются в значительной мере приближенными.

Методы исследования пористости цементных композитов можно разделить на три группы: физико-химические методы, методы оптической и электронной микроскопии, методы компьютерного моделирования.

Многочисленные физико-химические методы основаны на различных схемах конденсации, пропитки, продавливания или иного способа насыщения порового пространства жидкими или газообразными средами, а также удалении такой среды из образца путем откачивания, вытеснения, вакуумной сушки. При этом анализируют кинетику изменения или различие начальных и конечных значений измеряемых свойств (массы, электрического сопротивления образца, объема поглощенной/удаленной среды), могут измеряться также некоторые параметры самого процесса насыщения образца – например, давление при продавливании жидкости, сопротивление протеканию газа.

Наиболее информативными методами этой группы считаются: определение пористости материала по кинетике поглощения им воды или другой смачивающей жидкости, а также метод ртутной порометрии.

Несомненным достоинством метода исследования кинетики поглощения бетоном воды является определение «эксплуатационной» пористости, т.к. эксперимент проводится в условиях, близких к условиям реального применения материала. Существенным же недостатком следует считать принимаемую в данном методе модель порового пространства, включающую лишь прямые цилиндрические капилляры.

Метод ртутной порометрии (MIP – Mercury Intrusion Porosimetry) широко применяется при исследовании дифференциальной пористости цементного камня и растворной части бетона. Ртуть не смачивает подавляющее большинство материалов (краевой угол смачивания равен либо превышает  $90^\circ$ ) и может проникать в капилляры только под действием внешнего давления, которое связано с размером капилляра. При повышении давления ртуть проникает в капилляры все меньшего диаметра, поэтому становится возможной оценка распределения объема пор по размерам. При вдавливании ртути в капилляр не фиксируется форма его сечения, поэтому капилляры, по-прежнему, условно считаются цилиндрическими. Недостатком метода является образование вторичной пористости (вскрытие изначально недоступных пор и поровых областей) при высоких давлениях, вплоть до разрушения образца.

Общим недостатком физико-химических методов является измерение лишь открытой (доступной с поверхности образца) пористости, а также отсутствие достаточной информации о структуре порового пространства (форме и взаимном расположении пор).

Полная (открытая и условно замкнутая) пористость может быть исследована только прямым методом анализа структуры материала по изображениям среза (шлифа) образца, полученным с использованием оптической микроскопии высокого разрешения или растровой (сканирующей) электронной микроскопии (SEM – Scanning Electron Microscopy). Несомненные достоинства метода – возможность компьютерной обработки оцифрованного изображения, а также обособленной оценки различных дифференциальных параметров, в том числе распределения пор по размерам (дисперсионный анализ) [2].

Важное место в исследованиях пористых композитов занимают также методы компьютерного моделирования структуры материалов. Современная вычислительная техника поз-

воляет реализовать сложные трехмерные, в том числе динамические, модели дисперсных структур. Адекватность таких моделей обеспечивается, в числе прочего, сопоставлением результатов моделирования со структурными параметрами материала, определяемыми указанными выше эмпирическими методами, например MIP и SEM [3, 4, 5].

### **Дифференциальный анализ пористости по изображению шлифа образца**

Целью дифференциального анализа пористости материала является нахождение функции распределения количества (либо объема) пор по их размеру. Изображение плоского шлифа образца, например SEM – изображение, позволяет непосредственно найти лишь распределение количества сечений пор (или их площади) по некоторому их линейному размеру. Невозможно, однако, однозначно сформулировать понятие «определяющий размер» даже в отношении изолированной произвольной поры, поэтому на практике используют различные приближения формы пор простыми геометрическими телами (а сечений пор – плоскими фигурами). Связное же расположение пор, составляющих поровое пространство развитой конфигурации, еще более затрудняет решение поставленной задачи.

Известные алгоритмы дисперсионного анализа изображения пористых материалов основаны обычно на приближении формы капиллярной поры прямым цилиндром, произвольное плоское сечение которого представляет собой диметрическую фигуру – эллипс. Заполняя сегменты выделенной в сечении области пор вписанными эллипсами различного размера, оценивают как диаметр цилиндрического капилляра, так и его наклон относительно секущей плоскости. Очевидный недостаток данного способа обработки – неоднозначность покрытия поровой области произвольной конфигурации набором эллипсов, имеющих различные размеры, соотношение полу-диаметров и их ориентацию.

С целью повышения вычислительной эффективности алгоритма дифференциального анализа пористости, предлагается покрывать сегменты плоского сечения порового пространства изометрическими неориентированными фигурами, а именно – круглыми дисками. Представляется, что изометрическое покрытие, как минимум, не снизит адекватности результатов анализа пористости. Так, реальная форма капиллярных пор, как правило, отличается от прямого цилиндра с постоянным по длине диаметром. Как показано на рисунке 1, если поры имеют криволинейную ось симметрии, либо диаметр пор меняется по длине оси, то их плоские сечения удовлетворительно покрываются дисками. Диаметры таких дисков могут являться оценкой переменной ширины сечения капиллярного канала, а их количество косвенно определяет длину сечения.

Предлагаемая процедура изометрического покрытия поровых сегментов заключается в последовательном вписывании в них дисков максимально возможного размера, граничащих с контуром сегмента (твердой фазой материала) и/или ранее уложенными дисками. В отличие от известного алгоритма построения упаковки Аполлония ([6]), процедура включает два правила, предотвращающие чрезмерное покрытие сегмента дисками очень малого размера. Во-первых, размер дисков можно уменьшать лишь до некоторого установленного порогового значения, после чего покрытие прекращается. Каждый из элементов (пикселей) оставшихся непокрытыми малых фрагментов присоединяется к наименьшему из соседних ему дисков, в результате чего номинальный радиус диска формально возрастает до соответствующего (эффективного) значения. Во-вторых, допускается небольшое перекрытие периферийной области диска с твердой фазой или другим диском, если таковое улучшает покрытие порового сегмента. Соответственно величине перекрытия, номинальный радиус диска снижается (перекрытие двух дисков влечет уменьшение радиуса большего из них).

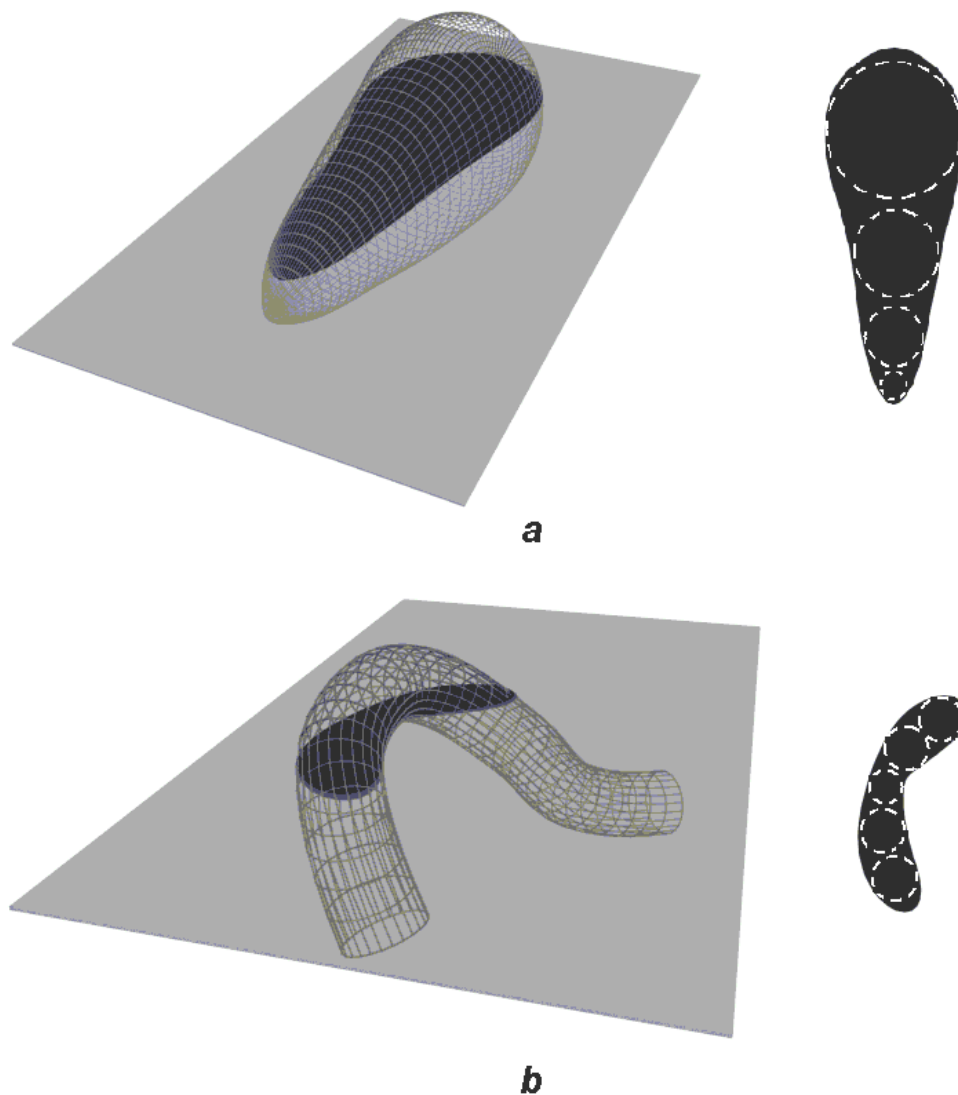


Рис. 1. Плоское сечение и изометрическое покрытие сечения капиллярной поры: с переменным диаметром (а), с криволинейной осью симметрии (b)

Применительно к цифровой модели изображения пористого материала, дискретная процедура изометрического покрытия реализована с помощью кольцевой маски, схема которой приведена на рисунке 2а. Окружности, генерируемые стандартными средствами программирования, составляют круговую область  $A$  и две кольцевые области  $B$  и  $C$ . Удвоенный внешний радиус  $r_B$  кольца  $B$  – суть номинальный размер  $D$  вписываемого диска, а радиусы  $r_C$  и  $r_A$  (внешний радиус кольца  $C$  и радиус круга  $A$ ) связаны с  $D$  допускаемыми величинами  $\delta$  и  $\varepsilon$  – размером непокрытых фрагментов и величиной перекрытия, соответственно:

$$\begin{cases} r_B = d / 2, \\ r_C = r_B + \delta, \\ r_A = r_B - \varepsilon. \end{cases} \quad (1)$$

Положение маски заданного размера определяется координатами  $(x, y)$  точки, указываемой для генерации окружности номинального диаметра. Маска перемещается по изображению с дискретностью в один пиксель. Каждому положению маски

соответствуют величины  $a_0, b_0, c_0$ , равные числу пикселей, принадлежащих поровому сегменту и попадающих, соответственно, в области  $A, B$  и  $C$ , а также величины  $a_1, b_1, c_1$ , равные числу попадающих в эти же области пикселей, принадлежащих твердой фазе материала либо ранее уложенным дискам. Наилучшее положение маски находится путем целочисленного решения задачи условной максимизации:

$$\begin{aligned} (x^*, y^*) = \\ = \arg \left\{ \max_{x, y} c_1 \mid a_0 \equiv 0, c_1 \geq 2, c_1/c_0 > b_1/b_0 \right\}, \quad (2) \end{aligned}$$

В найденном положении генерируется уложенный диск, а соответствующие пиксели поровой области помечаются как занятые, после чего находится следующее наилучшее положение такой же маски и т.д. В случае отсутствия решения уравнения (2) размер маски следует уменьшить и продолжить процедуру поиска. Заметим, что диаметр генерируемого шаблона окружности может задаваться с шагом в 1 пиксель, при этом номинальный радиус диска будет изменяться с шагом в 1/2 пикселя, а координаты центра диска с диаметром, равным нечетному числу пикселей, будут дробными. Наибольший

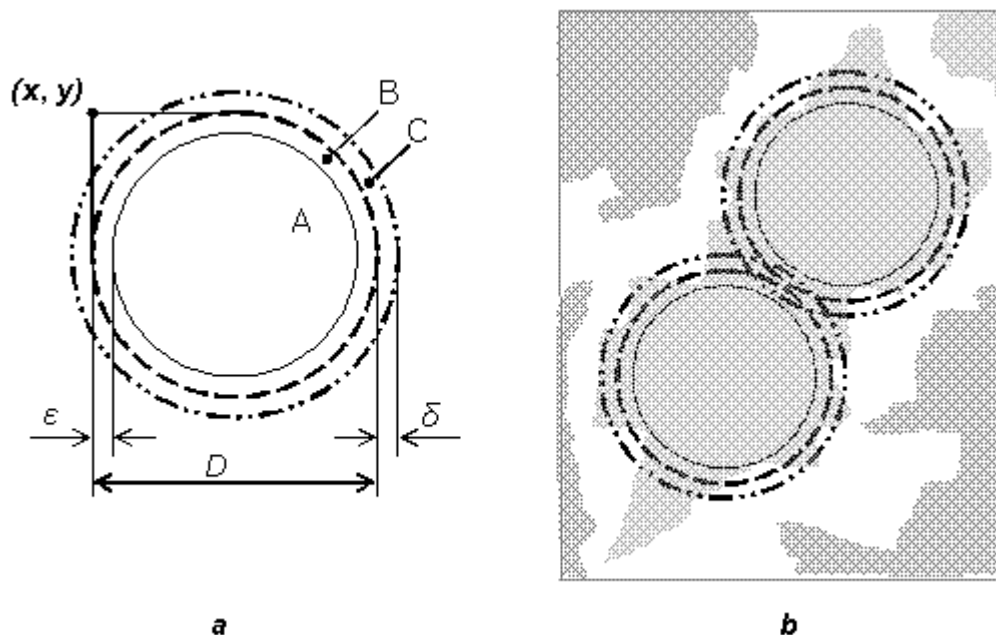


Рис. 2. Схема кольцевой маски (а) и пример покрытия сегмента поровой области (b)

(начальный) размер маски выбирается, например, из условия равенства площади диска и общей площади всех сечений пор на изображении (находится путем тривиального подсчета всех пикселей поровой области). Нижняя граница размера маски определяется удвоенной величиной  $\epsilon$ .

На основе описанной выше процедуры изометрического покрытия разработан следующий алгоритм дифференциального анализа пористости:

1. Сегментация исходного изображения плоского шлифа образца пористого материала с разрешением  $m \times n$  пикселей по яркостному признаку. Пороговое значение яркости рекомендуется определять как положение минимума между модами на бимодальной гистограмме яркости исходного полутонового изображения. Сегментированное изображение имеет два уровня яркости (например, на рис. 2b выделенному сегменту поровой области присвоена нулевая яркость, а единичная яркость, т.е. светлый фон, соответствует твердой фазе материала).
2. Вычисление интегрального параметра общей пористости, как отношения количества пикселей с нулевой яркостью (общей площади поровых сегментов), к общему количеству пикселей  $m \times n$  (общей площади изображения).
3. Задание начального диаметра  $D$  вписываемого диска (из условия равенства площади диска и общей площади поровых сегментов), а также допустимой величины перекрытия  $\epsilon$  и допустимого размера  $\delta$  непокрытых фрагментов сегмента. Все размеры задаются в пиксельных единицах, их метрические эквиваленты рассчитываются исходя из масштаба (увеличения) исходного изображения.
4. Циклическое применение процедуры изометрического покрытия сегмента:
  - а) генерация кольцевой маски текущего размера  $D$  согласно (1);
  - б) перемещение (например, построчное) маски по изображению, вычисление в каждой из  $(m - D) \times (n - D)$  позиций маски параметров  $a_i, b_i, c_i$  ( $i = 0, 1$ ), необходимых для решения задачи (2) условной максимизации;

- с) нахождение наилучшего в смысле (2) положения маски: в случае, если решение (2) найдено – генерация в данном положении покрывающего диска, заселение его в покрывающий набор и переход к п. 4а; если решение не найдено – уменьшение  $D$  на 1 пиксель и, если  $D > \delta$  – переход к п. 4а, в противном случае – переход к п. 5.

5. Формирование трех групп пикселей изображения: I – пиксели поровых сегментов, оставшиеся непокрытыми, II – пиксели поровых сегментов, покрытые более чем одним диском, III – покрытые дисками пиксели твердой фазы образца. Каждый из таких пикселей относится к одному из дисков покрывающего набора по следующим правилам. Пиксели группы I присоединяются к ближайшему из дисков (если расстояние до двух или более дисков одинаково – то к диску большего размера), пиксели группы III условно вычитаются из покрывающего его диска, а группы II – из того покрывающего диска, который имеет меньший размер. Пиксели группы I, таким образом, увеличивают номинальную площадь покрывающего диска, к которому они отнесены, а группы II и III – уменьшают ее. В связи с коррекцией номинальной площади дисков их размеры также пересчитываются до соответствующих эффективных значений.
6. Статистическая обработка эффективных размеров покрывающего набора дисков с получением гистограммы распределения размера пор. Если необходимо, выполняется также аппроксимация гистограммы подходящей функцией распределения.

**Опробование процедуры изометрического покрытия поровых сегментов и алгоритма анализа пористости**

Корректность процедуры изометрического покрытия проверялась, в составе разработанного алгоритма, на SEM-изображении плоского полированного шлифа цементного композита. На исходном изображении (рис. 3а) приведена информация о режимах проведения сканирующей электронной микроскопии. Изображение без данной служебной информации обработано медианным фильтром с крестообразным окном размером  $3 \times 3$  элемента, что позволило удалить

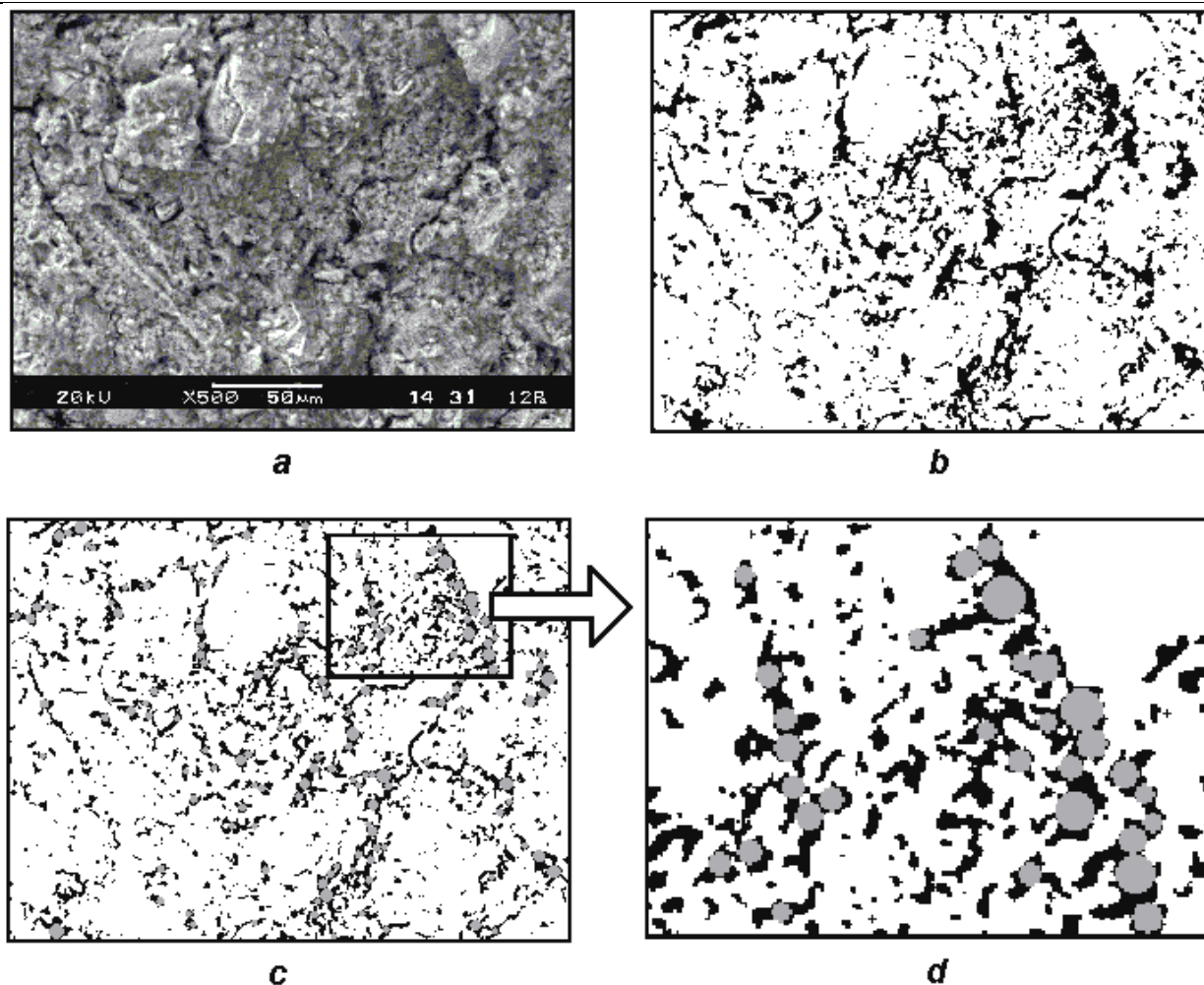


Рис. 3. Изометрическое покрытие сегментов поровой области цементного композита: SEM-изображение плоского шлифа образца с разрешением 640×480 (a); результат выделения поровой области методом сегментации по яркостному признаку (b); промежуточный результат покрытия сегментов изображения дисками (c) и его увеличенный фрагмент (d)

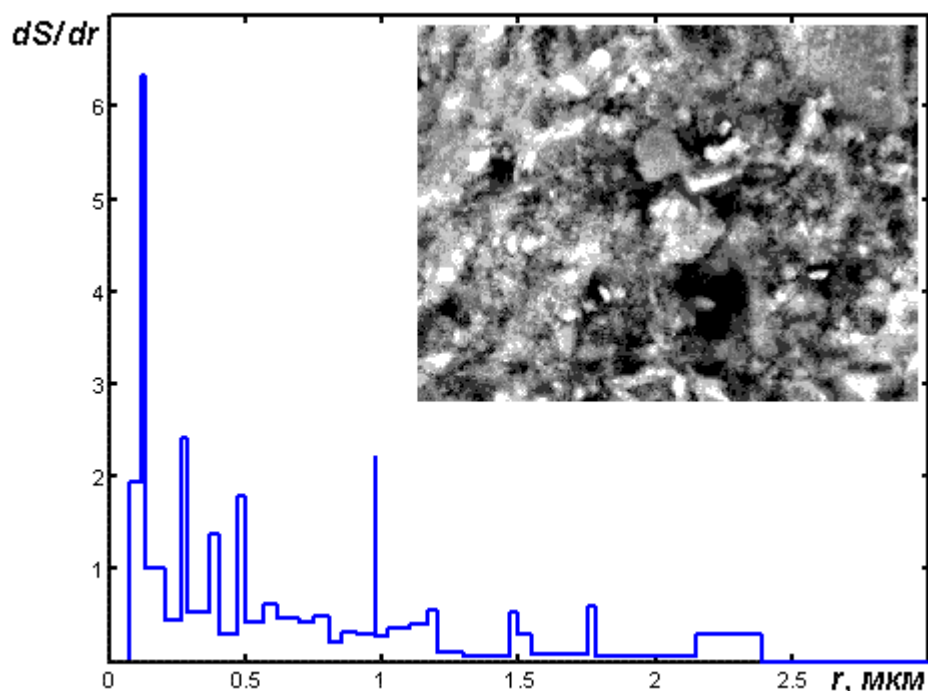
помехи в виде отдельных точек (пикселей) и царапин шириной 1 пиксель [7]. Затем выполнялась сегментация изображения по яркостному признаку, пороговое значение составило 70% от максимальной яркости изображения. Относительная суммарная площадь поровых (темных) сегментов, т.е. полная пористость материала, найденная по бинарному изображению поровой области (рис. 3b), составила 0,174.

Собственно процедура изометрического покрытия сегментов порового пространства иллюстрируется промежуточным результатом, представленным на рис. 3с, 3d. Допускаемая, согласно (1), величина  $\delta$  составляла 1 пиксель, а величина  $\epsilon$  была принята равной нулю, т.е. допускалось перекрытие пикселями твердой фазы только С-области маски (см. рис. 2а), а также аналогичное взаимное перекрытие масок. Приемлемое, без учета последнего неравенства в соотношении (2), покрытие получено, начиная с номинального диаметра маски в 17 пикселей, по мере выполнения процедуры диаметр уменьшался вплоть до 1 пикселя. Покрытие завершилось после размещения 13 855 дисков различного размера (в том числе – 10 308 дисков наименьшего диаметра), суммарная относительная площадь которых составила 0,162. Около 3700 непокрытых пикселей (примерно 6,9% поровой области) присоединялись к размещенным дискам, после чего вычислялись эффективные диаметры всех дисков (в связи с недопущением перекрытия В-области маски, диаметры дисков, преимущественно большего размера, только увеличивались). Поскольку

$\epsilon = 0$ , более 73% всего покрывающего набора составили диски наименьшего размера, при этом общая степень покрытия поровой области дисками достигает примерно 93%.

Приняв величину перекрытия  $\epsilon$  равной 1 пикселю, допускаем перекрытие твердой фазы и взаимное перекрытие С-областью и В-областью масок. В этом случае приемлемое, покрытие достигнуто, начиная с номинального диаметра маски в 18 пикселей, а уменьшение маски выполнялось, соответственно, вплоть до диаметра в 2 пикселя. Количество дисков в покрывающем наборе уменьшилось, а также число непокрытых пикселей поровой области уменьшились примерно в 1,5 раза. Общая степень покрытия поровой области превысила 95%. Часть пикселей, соответствующих твердой фазе, оказались перекрытыми В-областью масок, вследствие чего эффективный диаметр некоторых дисков мог изменяться как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения (последнее касалось преимущественно дисков меньшего размера).

Разработанный алгоритм был применен для анализа пористости цементного материала. Разрешение и увеличение изображения шлифа образца (после 2 суток твердения цемента в воде), полученного методом растровой электронной микроскопии, соответствовало истинному линейному размеру одного пикселя примерно 0,1 мкм. Исходное SEM-изображение и результат его обработки (без применения фильтрации) в виде дифференциального параметра пористости – функции распределения площади пор по их размеру – приведены на рисунке 4. Сравнительный анализ результатов



**Рис. 4.** Распределение площади пор по размеру, полученное обработкой SEM-изображения плоского шлифа образца цементного композита (на вставке) с применением алгоритма, основанного на процедуре изометрического покрытия поровых сегментов

обработки, выполненной с применением и без применения предварительной фильтрации этого же изображения, приведен в таблице 1.

Полученная эмпирическая функция (гистограмма) дифференциальной пористости, в общем, соответствует типовым характеристикам пористости цементных композитов, получаемых иными методами [3, 5], что свидетельствует об адекватности предлагаемого алгоритма анализа. Как видно из представленных в таблице результатов, предварительная фильтрация исходного изображения, практически не влияя на общую (полную) пористость, оказывает заметно большее влияние на номинальную степень изометрического покрытия порового пространства (после пересчета эффективных диаметров дисков, очевидно, достигается полное покрытие), а также на ко-

личество дисков в покрывающем наборе. Обнаружено, однако, что в обоих случаях и величина диапазона эффективных диаметров дисков, и общий характер функции дифференциальной пористости изменяются мало, что дает основания считать алгоритм достаточно устойчивым к операции фильтрации исходного изображения.

Наибольшую практическую ценность, конечно, представляют объемные характеристики пористости. В отличие от общей пористости, которая, согласно законам стереологии, одинакова и в объеме, и в плоском срезе неупорядоченного образца ([2]), функция распределения пор по размеру, найденная для плоского среза, отнюдь не идентична функции распределения размера пор в объеме материала. Ранее нами было найдено интегральное преобразование, устанавливающее однозначную взаимосвязь между подобными функциями ([8]), что позволяет реконструировать искомое объемное распределение из результатов анализа изображения плоского шлифа образца. Подобная реконструкция может выполняться как численными методами, так и аналитически – в зависимости от того, в каком виде представлены необходимые данные (полученную выше гистограмму можно, например, аппроксимировать подходящей функцией распределения).

**Выводы**

Разработан алгоритм анализа пористости композиционных материалов, заключающийся в цифровой обработке изображения шлифа образца. Алгоритм основан на оригинальной процедуре покрытия сегментов поровой области изометрическими фигурами – дисками различного диаметра. В связи с тем, что при выполнении процедуры подбирается

**Таблица 1.** Влияние предварительной фильтрации изображения, представленного на вставке рис. 4, на результаты изометрического покрытия поровых сегментов

Наименование и единица измерения параметра	Значение параметра	
	без предварительной фильтрации изображения	с предварительной фильтрацией изображения
Общая площадь поровой области, <i>пикселей</i>	72 483	71 927
Полная пористость	0,236	0,232
Площадь поровой области, покрытая дисками номинального размера, <i>пикселей</i>	56 795	63 871
Номинальная степень изометрического покрытия поровой области, %	78,4	88,8
Общее количество дисков в покрывающем наборе	12 553	9 976
Наименьший эффективный диаметр поры, <i>мкм</i>	0,08	0,06
Наибольший эффективный диаметр поры, <i>мкм</i>	2,39	2,63

единственный размерный параметр, алгоритм имеет меньшую вычислительную сложность по сравнению с алгоритмами, в которых используются иные фигуры – например, эллипсы.

Процедура изометрического покрытия достаточно устойчива к операции предварительной фильтрации изображения. Кроме того, она предусматривает настройку параметров в виде задания допустимых пределов для величины перекрытия дисков и области твердой фазы, а также для размера непокрытых фрагментов поровой области.

Алгоритм позволяет получать как интегральную характеристику пористости материала – полную пористость, так и дифференциальную функцию распределения площади (либо количества) пор по размеру. Получаемые эмпирические функции соответствуют типовым характеристикам пористости цементных композитов, получаемых иными, в том числе физическими, методами. На основании полученных данных, с применением интегрального реконструктивного преобразования, могут быть определены также функции дифференциальной пористости для объема материала.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шейкин А.Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. – М.: Стройиздат, 1979. – 344 с.

2. Пантелеев В.Г., Егорова О.В., Клыкова Е.И. Компьютерная микроскопия. – М.: Техносфера, 2005. – 304 с.
3. Vočka R., Gallé Ch., Dubois M., Lovera P. Mercury intrusion porosimetry and hierarchical structure of cement pastes. Theory and experiment // Cement & Concrete Research. – 2000, Vol. 30. – P. 521-527.
4. Ye G., van Breugel K., Fraaij A.L.A. Three-dimensional microstructure analysis of numerically simulated cementitious materials // Cement & Concrete Research. – 2003, Vol. 33. – P. 215-222.
5. Hu J., Stroeven P. Depercolation threshold of porosity in model cement: approach by morphological evolution during hydration // Cement & Concrete Composites. – 2005, Vol. 27. P. 19-25.
6. Медведев Н.Н. Метод Вороного-Делоне в исследовании структуры некристаллических систем / РАН, Сиб. отд-ние, РФФИ, Ин-т химической кинетики и горения СО РАН. – Новосибирск: НИЦ ОИГТМ СО РАН, Издательство СО РАН, 2000. – 214 с.
7. Прэрт У. Цифровая обработка изображений. – М.: Мир, 1982. – Кн. 2. – 480 с.
8. Дереченник С.С., Разумейчик В.С., Тур В.В. Закономерности топологической неупорядоченности в плоских сечениях и объемах дисперсных систем // Вестник БГТУ. Сер. Строительство и архитектура. – 2005. – № 2 (32). – С. 18-25.

Статья поступила в редакцию 28.01.2007

УДК 004.8.032.26

**Головко В.А., Войцехович Л.Ю., Шевеленков В.В.**

## НЕЙРОСЕТЕВЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СИСТЕМ ОБНАРУЖЕНИЯ АТАК НА КОМПЬЮТЕРНЫЕ СЕТИ

### 1. Введение

Одной из форм глобализации мирового пространства является информационная глобализация, которая связана с повсеместным распространением сети Интернет. Определяющим направлением развития компьютерной отрасли стало внедрение и расширение сетевых систем.

В результате этого значительно возросло количество атак и злоупотреблений в сфере высоких технологий. Поэтому вопросу безопасности компьютерных систем уделяется все больше и больше внимания.

Задачей Систем Обнаружения Атак (Intrusion Detection Systems - IDS) является защита компьютерных сетей. В последнее время системы IDS активно изучаются. Они должны выполнять свои функции в режиме реального времени. Существует два основных метода в сфере обнаружения атак: обнаружение злоупотреблений (misuse detection) и обнаружение аномалий (anomaly detection). Обнаружение злоупотреблений предполагает наличие сигнатур атак. Основным недостатком таких систем является их неспособность обнаруживать новые или неизвестные атаки, т.е. записи о которых в системе отсутствуют. Примерами систем обнаружения злоупотреблений могут служить: IDIOT [1], STAT [2] и Snort [3]. Обнаружение аномалий связано с построением профиля нормального поведения пользователя. Причем атакой считается любое отклонение от этого профиля. Главным преимуществом таких систем является принципиальная возможность определения ранее не встречавшихся атак. Примеры таких систем: IDES [4] и EMERALD [5].

В настоящее время разрабатывается большое количество различных технологий защиты компьютерных сетей, которые базируются на применении нейронных сетей (neural networks), на технологиях извлечения данных (data mining),

статистическом анализе и т.п. Так, например, классификатор главных компонент представлен в работах [6, 7]. Различные технологии извлечения данных описаны в [8, 9]. Другие авторы предлагают геометрические структуры в задачах обнаружения атак, это: алгоритмы кластеризации, алгоритмы k-Nearest Neighbor (k-NN) и Support Vector Machine (SVM) [10, 11]. Кроме того, для обнаружения атак могут применяться различные нейронные сети [12, 13]: самоорганизующиеся карты Кохонена (Self Organizing Maps - SOM), многослойный персептрон (Multilayer Perceptron - MLP), сети радиально-базисной функции (Radial Basis Function - RBF).

К недостаткам существующих моделей IDS, в первую очередь, можно отнести уязвимость к новым атакам, низкая точность и скорость работы. Современные системы обнаружения вторжений плохо приспособлены к работе в реальном режиме времени, в то время как возможность обрабатывать большой объем данных в реальном режиме времени – это определяющий фактор практического использования систем IDS.

В нашей предыдущей статье [14] рассматривались различные варианты архитектур систем IDS, которые были основаны на применении комбинаций линейной рециркуляционной нейронной сети (Recirculation Neural Network - RNN) и многослойного персептрона. Эта статья является продолжением предыдущих работ, и здесь предлагаются новые модели: линейная RNN (LRNN) и MLP, нелинейная RNN (NRNN) и MLP, Ансамблевая нейронная сеть (Ensembling Network - EN). Задачей RNN является сжатие входного пространства образов с целью получения главных компонент. Многослойный персептрон производит основные вычисления, связанные с распознаванием входного вектора, используя информацию, предоставленную рециркуляционными нейронными сетями.

*Головко Владимир Адамович, д.т.н., заведующий кафедрой интеллектуальных информационных технологий БрГТУ.*

*Войцехович Леонид Юрьевич, магистрант кафедры интеллектуальных информационных технологий БрГТУ.*

*Шевеленков Виталий Вячеславович, ассистент кафедры интеллектуальных информационных технологий БрГТУ.*

*Беларусь, Брестский государственный технический университет, 224017, Беларусь, г. Брест, ул. Московская, 267.*